

## PLC에서 구현한 PID 제어의 와인드업 현상 극복

정태수\*, 남재우\*, 오연식\*, 박용운\*, 이영준\*

\* LS 산전

### A breakthrough of PID control windup state using PLC

Taeso Jung\*, Jaewoo Nam\*, Yeonsik Oh\*, Yongoon Park\*, Youngjoon Lee\*

\* LS Industrial Systems Co., Ltd.

**Abstract** - Since it has an advantage of possibility to control using experimentally given coefficient, PID Control is the most widely used method of control in the field of industry. However, since PID controller is not able to reflect the inherent characteristics of individual systems, it needs to be accompanied by additional techniques to supplement. Also, it has disadvantage that it is hard to find a satisfactory coefficient when the state of the system's dynamic characteristics and static characteristics are different each other. When the dynamic one shows up, it means the state of system shows a great amount of difference from that of desired such as the moment of beginning control or change of desired state. But, if the state of the system comes close to the desired state, the static characteristics shows up in the system. There are many solutions suggested to overcome problems according to the conversion of two examples of motion shown above.

This paper is to confirm PID control's integration ingredient windup phenomenon, and experiment through technique of prevention of windup actually using PLC(Programmable Logic Controller), and to verify the change in characteristics of control.

## 1. 서 론

PID 제어는 제어 플랜트를 모델링하지 않고도 시험적으로 도출된 계수를 이용해서 제어가 가능하다는 장점이 있기 때문에 산업 분야에서 가장 많이 사용하는 제어 기법이다. 반면에 PID 제어기는 개별 시스템의 특이점을 반영해 주지 못하기 때문에 부가적인 기법으로 이를 보완해 줄 필요성이 있다. 그 중에서도 시스템 상태의 동특성과 정특성이 상이한 경우에는 두 가지 특성을 모두 만족하는 계수를 찾아내기 힘들다는 단점이 있다. 시스템 상태의 동특성이 나타나는 대표적인 경우는 주로 제어 시작 시의 경우 또는 목표 상태가 크게 변경된 경우 등 시스템의 상태가 목표 상태와 큰 차이가 있는 경우이며, 반면에 시스템의 상태가 목표 상태에 근접한 경우에는 시스템에 정특성이 나타난다. 앞선 두 가지 동작 영역의 전환에 따른 차이를 극복하기 위해 많은 방법이 제시되고 있다.

본 논문에서는 PID 제어의 적분 성분 와인드업 현상을 확인하고 이를 극복하기 위해 고안된 와인드업 방지 기법을 실제로 PLC(Programmable Logic Controller)를 이용하여 실험해보고 제어 특성의 변화를 확인해 보고자한다.

## 2. 본 론

### 2.1 PID 제어기의 출력 방정식

PID 제어기의 출력 방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다[1], [2].

$$MV(t) = MV_P(t) + MV_I(t) + MV_D(t) \quad (1)$$

여기서  $MV(t)$ 는 PID 제어기의 출력이며  $MV_P(t)$ ,  $MV_I(t)$ ,  $MV_D(t)$ 는 각각 비례, 적분, 미분 성분의 연산 결과들이다. 시스템의 상태를  $PV(t)$ , 시스템의 목표 상태를  $SV(t)$ 라고 하면 시스템 상태의 오차  $EV(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$EV(t) = SV(t) - PV(t) \quad (2)$$

여기에 비례, 적분, 미분 계수를 각각  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ 라고 하면 식 (1)에서 각각의 성분은 아래와 같이 전개된다.

$$MV_P(t) = K_P \cdot EV(t) \quad (3)$$

$$MV_I(t) = \frac{K_P}{T_I} \int EV(t) dt \quad (4)$$

$$MV_D(t) = K_P \cdot T_D \cdot \frac{dEV(t)}{dt} \quad (5)$$

위의 식 (4)와 같이 적분 연산이 포함됨으로 인해서 현재의 결과는 과거의 출력 결과에 종속적이게 된다. 이 때문에 시스템의 상태가 동특성 영역에서 정특성 영역으로 전환하는 과정에서 적분항의 와인드업 현상이 일어난다. 즉, 동특성 영역에서 큰 상태 오차에 의한 큰 적분 결과는 적분 성분을 크게 변화시켜 와인드업 현상을 초래한다. 이 시스템이 정특성 영역으로 이동할 경우 상대적으로 작아진 상태 오차 때문에 적분 결과가 다시 안정 상태로 복구되는데 오랜 시간이 소요되는 것이다. 결과적으로 빠르게 증가한 적분량은 평형점을 지나치게 되어 오버슈트를 초래하고 시스템의 안정에 부정적인 효과를 미친다.

### 2.2 제어 시스템의 특성

서론에서 언급한 바와 같이 제어 시스템에는 제어 상태에 따라서 동특성과 정특성이 나타난다. 대부분의 제어 시스템에서는 제어 시작 시, 동특성영역을 지나 시스템이 원하는 상태로 안정됨에 따라 정특성 영역에 진입, 유지하게 된다. 앞 절에서 살펴 본 비례, 적분, 미분 각각의 성분으로 나누어 시스템의 두 특성 영역을 살펴보면 흥미로운 점을 발견할 수 있는데, 이는 비례 성분을 관찰하면 알 수 있다. 동특성 영역에서 비례 연산에 의한 결과는 양 또는 음의 방향으로 매우 큰 값에서부터 점점 그 크기가 줄어들다가 정특성 영역에 진입하게 되면 비례 연산에 의한 결과는 0이라는 점이다. 이것은 앞의 식 (2)에

$$SV(t) = PV(t) \quad (6)$$

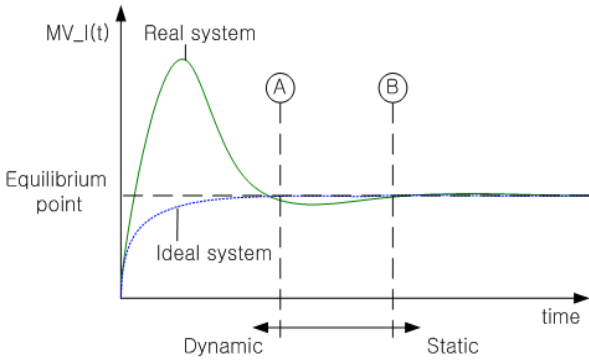
를 대입하면 식 (3)이 0으로 정리되는 것으로도 알 수 있다[2], [3].

실제 시스템에서 구성된 제어 프로세스를 관찰해 보면 시스템의 구동기는 유한한 크기의 출력, 즉 출력의 최대값과 최소값을 지닌다. 그리고 상태 유지가 가능한 최고점까지 충분한 속도로 도달 시켜줄만한 출력을 가진다. 따라서 앞 절에서 설명했던 특성영역에 대한 결과를 실제 시스템에 맞춰보면 우선 동특성 영역에서 제어 시스템의 비례 성분 출력은 구동기의 최대 혹은 최소 출력까지 포화 상태에 도달하여 점차 0로 다가가게 된다.

마찬가지로 적분 성분 결과에 대해서 살펴보면 동특성의 시작 영역에서 0부터 빠르게 증가한 적분 성분은 정특성 영역에 진입하게 되면 더 이상 증가도, 감소도 하지 않는다. 따라서 이상적인 제어 시스템은 적분의 속도가 적절히 조절되어 시스템이 동특성 영역을 벗어나 정특성 영역에 진입하는 순간에 시스템 평형점에 도달해 주는 시스템이다. 그러나 실제의 시스템에서 동특성 영역의 적분의 속도는 매우 빠르기 때문에 대부분의 경우 동특성 영역 구간에서 이미 시스템의 평형점을 지나쳐서 크게 증가 또는 감소하게 된다.

아래의 그림 1은 이상적인 시스템과 실제 시스템의  $MV_I(t)$  연산 결과의 거동을 보여준다. 이상적인 시스템에서는 정특성 영역이 시작되는 곳에서  $MV_I(t)$ 가 평형점에 도달하기 때문에 ㉠ 지점에서 제어 시스템은 안정 상태에 도달하게 된다. 반면에 실제의 제어 시스템에서는  $MV_I(t)$ 가 급격하게 증가하기 때문에 상대적으로 느린 ㉢ 지점에서 평형점에 도달하며 특히  $MV_I(t)$ 가 감소하는 구간은 적분량이 감소하였으므로  $EV(t)$ 가 음수, 즉 오버슈트 상태의 구간임을 알 수 있다. 이와 같이 PID 제어 시스템의 적분 성분 결과가 평형점 이상으로 크게 증

가하는 것을 PID 제어의 적분 와인드업 현상이라 한다. 이러한 현상은 시스템의 구동 초기 상황이나  $SV(t)$  변경 및 외란의 영향으로  $EV(t)$  가 크게 증가 또는 감소한 경우에 나타난다.



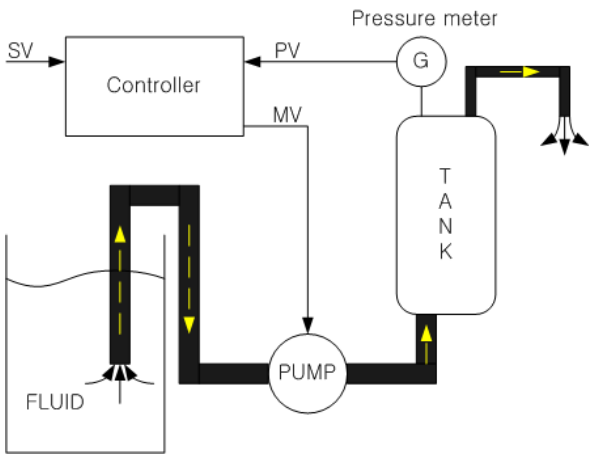
〈그림 1〉 시스템의  $MV_I(t)$

### 3. 실험

그림 1과 같이 시스템의 제어 과정에서  $EV(t)$  가 큰 경우  $MV_I(t)$  가 크게 증가하는 것을 막기 위하여 동특성 영역 중 일부 구간에서 적분을 일시 정지하는 실험을 수행하였다. 이는 동특성 영역의 일부 구간에서 PID 제어가 아닌 PD 제어를 수행하는 것을 의미한다.

동특성 영역 중에서 적분 연산이 중지되는 구간은  $MV_P(t)$  를 관측하여 알 수 있는데  $MV_P(t)$  가 구동기의 최대 또는 최소 출력으로 포화된 경우이다.  $MV_P(t)$  성분이 이미 구동기를 포화 시켰으므로  $MV_I(t)$  가 합산되지 않더라도 PID 제어와 PD 제어가 같은 결과를 갖게 된다. 따라서 적분 연산의 시작점을 늦게 설정함으로써 와인드업 현상을 막을 수 있다는 가설을 수립하였다[3].

#### 3.1 실험 장치 구성 및 실험 방법

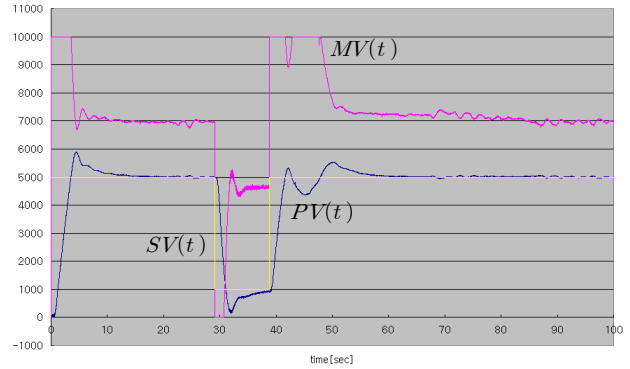


〈그림 2〉 압력 탱크의 압력 제어 시스템 구성도

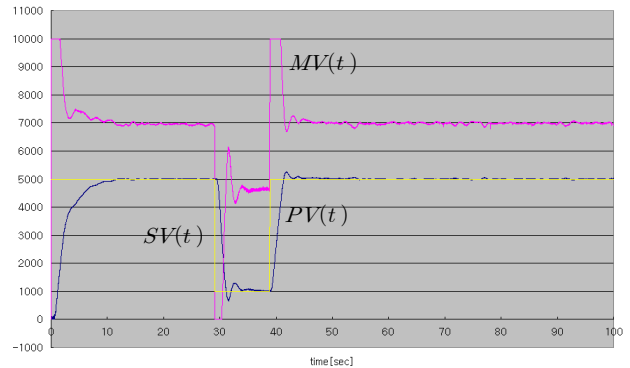
그림 2는 본 실험에 사용된 탱크의 압력 제어시스템의 구성도이다. 압력 탱크의 압력이 결정되면 탱크에서 배출되는 유체의 유량이 결정되게 된다. 따라서 압력을 제어하여 유체의 배출 속도를 조절할 수 있다. 실험에 사용된 제어기로는 PLC (Programmable Logic Controller)가 사용되었으며 샘플링 속도는 0.4 msec 이다. 상태 값은 탱크의 압력으로 시스템이 가지는 최대 압력 10 psi 와 최소 압력 0 psi를 각각 10000과 0으로 스케일링하여 사용했다. 제어 출력은 최대 출력 전압 5 V와 최소 출력 전압 0 V를 각각 10000과 0으로 스케일링하여 사용했다. 목표 상태는 5 psi 즉, 5000을 기본으로 하였고 실험 중 30초 부근에서 와인드업 현상을 확인하기 위해서 목표 상태를 10초간 1 psi 로 변경 후 다시 5 psi로 복구시킨다. 실험에 쓰인 PID 계수는 안정 상태 기준으로 자동 동조된 결과를 두 가지 실험에 동일하게 사용하였다.

#### 3.2 실험 결과

그림 3은 와인드업 현상이 발생한 실제 시스템의 전형적인 제어 결과이며 그림 4는 와인드업 현상의 발생을 방지한 실제 시스템의 결과를 나타내고 있다.



〈그림 3〉 와인드업 현상이 나타난 시스템



〈그림 4〉 와인드업 현상을 방지한 시스템

가장 큰 특징은 우선 제어 시작 시에  $PV(t)$  가  $SV(t)$  를 초과하는 오버슈트 개선 현상을 들 수 있다. 시험 초기 최대 오버슈트 0.9 psi 가 그림 4에서는 관측되지 않으며  $SV(t)$  변경 시에는 기존 대비 약 20%의 오버슈트만 나타날 뿐이다. 이 두 경우의  $MV(t)$  거동을 관찰하면 알 수 있듯이  $MV(t)$  값이 구동기의 최대 또는 최소 출력을 전달하는 구간이 짧아진 것을 알 수 있다. 두 번째 변화는 안정 상태 도달 시간을 들 수 있는데 기존 약 15초 구간에서 안정하던 시스템은 와인드업 방지 후 약 12초 구간에서 안정 상태에 도달하게 되었다. 특히  $SV(t)$  값이 1000에서 5000으로 복구된 구간을 관찰하면 와인드업 현상을 방지한 시스템의 결과가 그렇게 하지 않은 일반 시스템 대비 25% 미만의 시간으로 안정 상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 세 번째로 위와 같이 시스템 상태의 진동을 방지시킴으로써 정특성이 나타나기 시작하는 안정 상태 초기 단계의 시스템 제어성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 와인드업을 방지하여 일시적으로 기존 PID 제어에서 PD 제어를 적용시킨 후의 시스템 상태의 반응 속도를 들 수 있는데  $PV(t)$  의 상승, 하강 시 두 시스템 모두 같은 기울기를 가지고 있으므로 와인드업 현상이 방지되어도 시스템 제어 속도에는 영향을 미치지 않는다는 점을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 PID 제어가 제어 대상 시스템의 동특성과 정특성을 모두 반영하지 못하는 경우가 있음을 실제 시스템을 분석하여 제시 하였으며 이 문제를 PID 제어의 적분 성분 와인드업 현상을 방지하는 방법으로 해결할 수 있다는 점을 실제 실험을 통해 제시하였으며 해당 실험과 같이 일반적인 PID 제어 시스템에서 탁월한 제어 성능 향상이 있다는 것을 검증하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Lennart Ljung., "System Identification", P.H. PTR, 2nd, pp.18-61, 1998
- [2] Karl J. Astrom., "PID Controllers", ISA, 2nd, pp. 273-321, 1994
- [3] Tan K. Kiong., "Advances in PID Control", Springer, 1st, pp. 35-89, 1999